

## Co基アモルファス合金を用いたスイッチング電源用 高性能磁心材料に関する研究

著者	山内 清隆
号	1460
発行年	1993
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10267">http://hdl.handle.net/10097/10267</a>

氏 名	山 内 清 隆
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学 位 授 与 年 月 日	平 成 6 年 2 月 9 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 46 年 3 月 名古屋大学大学院工学研究科金属工学および鉄鋼工学 専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	C o 基アモルファス合金を用いたスイッチング電源用 高性能磁心材料に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 増本 健      東北大学教授 藤森 啓安 東北大学教授 深道 和明

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒 論

多くの電子機器に用いられているスイッチング電源のうちで、可飽和リアクトルを制御素子として用いた磁気制御型（マグアンプ方式）スイッチング電源は、半導体スイッチを用いる方式などに比べて、低ノイズで高信頼性を得やすい等の特長がある。しかし、可飽和リアクトルとして従来用いられてきた Fe-Ni パーマロイ合金は、高周波における磁心損失が大きく、磁気制御型スイッチング電源の高周波化による小型軽量化の阻害要因となっていた。また、スイッチング電源のコンモードノイズを除去するコンモードチョークとしては、実効透磁率  $\mu_e$  が大きい事が望ましいが、従来から用いられている Mn-Zn フェライトは  $\mu_e$  が十分でないという問題があった。一方、1970年代からアモルファス合金の基礎および実用化研究が活発化した。中でも Fe-Si-B 系や Co-Fe-Si-B 系アモルファス合金は優れた軟磁性を示すことが明らかとなり、変圧器用鉄心や磁気ヘッド、磁気センサーなどに実用化されるようになった。

本研究の目的は、上記スイッチング電源の問題を解決する手段として Co 基アモルファス合金を高周波で駆動するスイッチング電源用の磁心材料（可飽和リアクトルおよびコンモードチョーク）として実用化することにある。本章では、Co 基アモルファス合金をスイッチング電源用磁心材料として実用化するための研究経過を述べ、本研究の意義および上記目的を達成するための指針について述べた。

## 第2章 試料作製方法および測定方法

本章では、第3～5章に示す実験を行なうために用いた試料作製方法および測定方法につき示した。

## 第3章 Co基アモルファス合金の磁気特性とその評価

上記目的を達成するために、ほぼ零磁歪組成のCo-Fe-Si-Bアモルファス合金を基本として、Mn, Mo, Cr, Nb, Ni の添加効果を検討し、磁氣的性質および物理的性質との関係を明らかにした。

本研究の組成範囲において、工業的に実用可能な程度に粘く、軟磁気特性が比較的良好な薄帯を得るためには、Bが約9 at%以上必要であることを見出した。この結果から、原料価格の高いB量は少ない方が好ましいため、B量を9 at%として以下の研究を進めた。

零磁歪付近のCo-Fe-Si-Bアモルファス合金にMnを添加した場合、MnはBsを余り下げることなく、Tcを低下させ、比較的優れた軟磁気特性を示すことが判った。Mnを添加した合金のうちで、比較的優れた軟磁気特性を示す組成をAm Iとし、表1に示す。零磁歪付近のCo-Fe-Mn-Si-Bアモルファス合金に添加元素としてMo, NbおよびCrを添加すると、結晶化温度Txが上がり、Tcが下がるために、軟磁気特性が向上したが、一方、Niの添加ではTxおよびTcに与える影響が小さく、軟磁気特性も余り変化しない。また、軟磁気特性とリボンの粘さや磁化曲線の角形比との兼ね合いを検討した結果、上記添加元素としてMoが最も有効であることがわかった。このMo添加合金に関し、磁歪の極小化など実用材料として必要な組成の検討を行ない、表1に示す高透磁率合金のAm IIおよび低磁心損失合金のAm IIIを見出した。

表1 本研究により開発したCo基アモルファス合金の組成および物理特性

材 質	組 成 (a t %)						T c (K)	T x (K)
	C o	F e	M n	M o	S i	B		
A m I	69 ~ 71	0.3 ~ 0.4	5 ~ 6	—	14.5 ~ 15.5	8.7 ~ 9.7	543	798
A m II	68 ~ 70	1.7 ~ 1.9	1.5 ~ 2.5	4.5 ~ 5.5	12.5 ~ 13.5	8.7 ~ 9.7	485	796
A m III	67 ~ 69	1.3 ~ 1.4	3 ~ 4	2 ~ 3	14.5 ~ 15.5	8.7 ~ 9.7	483	813

上記の高透磁率合金(Am II)は、無磁場中焼鈍を行うことにより、中角形比の磁化曲線を示し、図1に示すように、実効透磁率 $\mu$ 。(周波数 $f = 1 \text{ kHz}$ )の最大値として約90,000が得られた。これをリボン幅方向に磁場を加えながら時効すると、低角形比のフラットな磁化曲線となり(Am II Lと表示)、時効温度と時間を適切に設定することにより最高330,000の $\mu$ を得た。この値は、従来報告されているCo基アモルファス合金のうち最高レベルの値である。

また、低磁心損失合金(Am III)をリボン長手方向に磁場を加えて時効すると、高角形比の磁化曲線となり(Am III Hと表示)、磁心損失Pc(周波数 $f = 100 \text{ kHz}$ , 最大磁束密度 $B_m = 0.2 \text{ T}$ )は低角形比材より増大するが、Mo無添加のAm I合金に比べてその増加の程度は小さい。Am III

合金では適切な時効条件により、図2に示すように、85%の角形比でも磁心損失 $P_c$ が $450\text{ kW/m}^3$ となり従来報告されている高角形比C $\alpha$ 基アモルファス合金と比べて最も小さなレベルの値となる。

また、C $\alpha$ 基アモルファス合金について磁気特性のリボン板厚依存性を検討した結果、高角形比の材料は、中角形比や低角形比の材料に比べて、実効透磁率や磁心損失の板厚依存性が小さいことを見出した。

C $\alpha$ 基アモルファス合金の磁心損失をヒステリシス損失、古典的渦電流損失および異常渦電流損失に分離すると、異常渦電流損失は角形比の大きな磁心ほど大きい。そこで、時効条件の異なるAm I HおよびAm III H(Hは高角形比を意味する)について、カー効果により磁区観察を行った結果、図3に示すように、磁区幅 $d$ と磁心損失 $P_c$ との間に比例関係があることが判った。また、磁区幅 $d$ と一軸磁気異方性エネルギーとの関係にも比例関係があることから、C $\alpha$ 基アモルファス合金の高角型比と磁心損失を両立させるためには以下の点が重要であることを明らかにした。磁歪を小さくし、かつ飽和磁束密度、結晶化温度、キュリー温度の兼ね合いから誘導磁気異方性が生じにくい組成を選び、十分に内部応力を緩和する焼鈍を行ったのち、磁区幅を余り大きくしない程度にリボン長手方向に均一な誘導磁気異方性を付与する磁場中時効を行なうことが重要である。

C $\alpha$ 基アモルファス合金の実効透磁率、角形比および磁心損失の経時変化を詳細に検討した結果、その変化は核生成・成長の解析に用いられるジョンソン・メール・アブラミの式を用いて予測することが可能であることが判った。また、経時変化を小さくするためには、熱処理によりあらかじめ透磁率を小さくしておくか、高角形比化した磁心を用いることが必要であることを明らかにした。

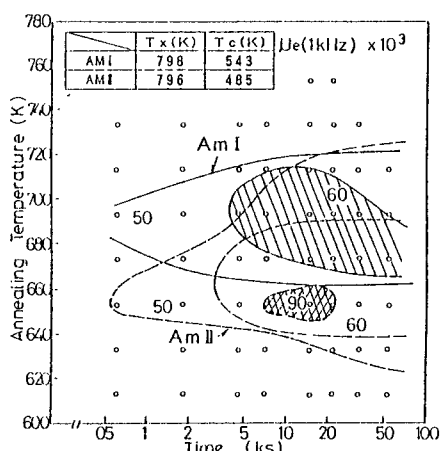


図1  $\mu_e$  (1 kHz) の焼鈍温度および焼鈍時間依存性(焼鈍後水冷)

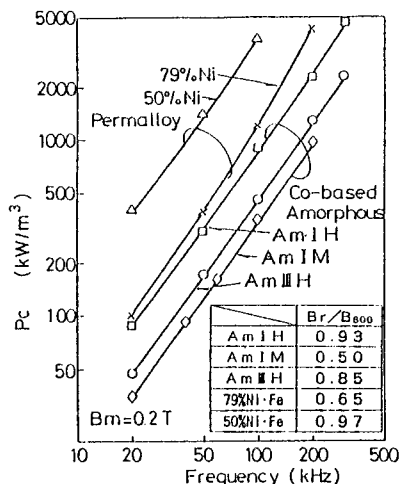


図2 磁心損失 $P_c$ の周波依存性

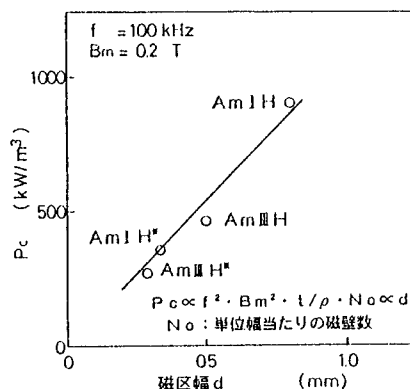


図3 磁心損失 $P_c$ と磁区幅 $d$ との関係

また、C o 基アモルファス合金の場合には、焼鈍時の温度が高いと磁化曲線が非対称になり易く、この非対称の程度は磁場中で時効することにより顕著になることを見出した。非対称性が生成する原因については解明するに至らなかったが、リボン表面をエッチングすることにより、非対称性の程度がある程度改善されることから、リボン表面の部分的結晶化などの変質層の形成が非対称の主原因であると推定した。

#### 第4章 スイッチング電源用C o 基アモルファス磁心の評価

本章では、第3章で検討した高透磁率合金および高角形比・低磁心損失合金を用い、スイッチング電源用コモンモードチョークコイルおよび可飽和リアクトルとしての評価を行ない、実用化の可能性を検討した。

高透磁率C o 基アモルファス合金 (Am I M, Am II L) を用いたコモンモードチョークコイルは、図4に示すように、約9 MHz 以下のノイズの除去に有効であり、市販のM n -Z n フェライトを用いたコイルよりも効果が大きいことが判った。しかし、高透磁率C o 基アモルファス合金は、室温以上で透磁率の経時変化が大きいため、磁心の周囲温度が最高約340 K にもなるスイッチング電源内の部品として使用する際には、あらかじめ経時変化を見込んだコイルの設計が必要であることが明らかになった。

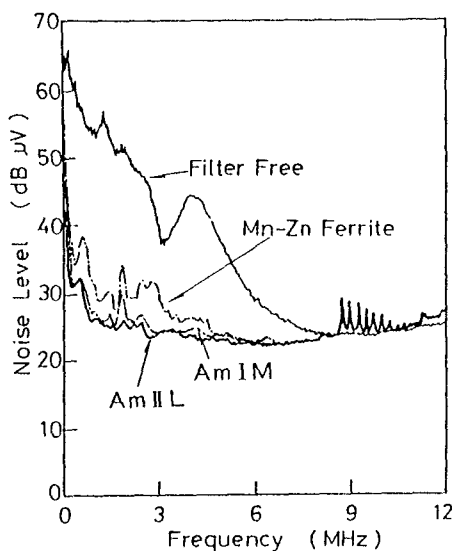


図4 入力端子漏出コモンモードノイズの測定結果

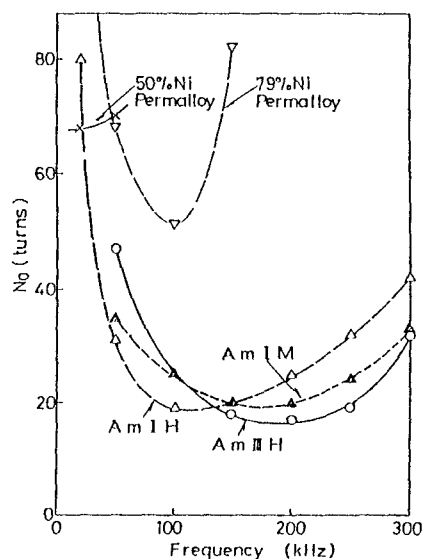


図5 可飽和リアクトルの最少巻線数Noの周波数依存性

可飽和リアクトルの動作磁化曲線を300kHzの高周波まで評価した結果、直流磁化曲線の角形比の小さな磁心では、制御不能磁束密度 $B_b$ （出力制御に利用できない磁束密度量）が高周波でも大きく、可飽和リアクトル磁心として不利であることが判った。また、角形比の低い磁心では、経時変化が大きいため、直流磁化曲線の角形比を高くすることが必要条件であることを示した。

次に、可飽和リアクトルとしてどの程度の周波数で用いるのが最も有利かを定量化する検討を行った。その結果、スイッチング電源としては、出力側に最も多く電力を供給し得る条件（最大出力条件）と全電圧を阻止し、出力側への供給電力を零とする条件（最小出力条件）を満足する必要がある。そこで、上記の条件式を導出し、各周波数について主変圧器の2次側電圧および可飽和リアクトルの制御巻線巻数 $N_o$ の最小値を求めた。図5に $N_o$ の周波数依存性を示す。AmⅢH合金での $N_o$ は約200kHzにおいて最少となることから、最適周波数は約200kHzにあることがわかった。

可飽和リアクトル磁心の定量的評価のために有効な矩形波励磁・制御磁化特性（CMC）の評価方法を考案し、Co基アモルファス磁心の評価を行った結果、AmⅢH合金が可飽和リアクトルとして最も優れることを見出した。矩形波励磁による定電流リセットマイナーループから、Co基アモルファス磁心の磁心損失を評価し、磁心の温度上昇との関係を求めることにより、Co基アモルファス合金を用いた可飽和リアクトルの定量的設計を可能にした。

## 第5章 Co基アモルファス可飽和リアクトル磁心を用いた200kHz磁気制御型 スイッチング電源の設計と評価

本章では、第4章の結果をふまえ、Co基アモルファス合金AmⅢHを用いた可飽和リアクトル磁心の適正な設計方法を検討し、考案した設計方法の妥当性を検証することにより、高周波駆動の可飽和リアクトル磁心としてのCo基アモルファス合金の有効性を検討した。

高周波で駆動する2出力スイッチング電源について、従出力の出力安定化を行うために必要な条件式から、可飽和リアクトルの適正な設計を行うための式を導出した。上記設計式に第4章で求めた各種の磁心のパラメータを適用し、200kHz駆動の2出力磁気制御型スイッチング電源（出力：DC 5V, 1～10A, 出力Ⅱ：DC 12V, 0～5A）の設計を行った。

上記設計により作製したスイッチング電源の出力電圧特性を図6に示す。設計値に対する出力変動は0.5%以下であり、設計方法の妥当性が検証できた。本研究によるスイッチング電源は、その効率が約80%であり、磁心損失が小さなCo基アモルファス合金AmⅢHを可飽和リアクトルに用い

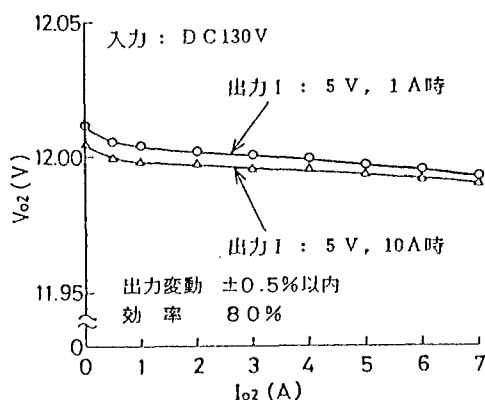


図6 試作電源の出力Ⅱの出力電圧特性  
( $Vo_2$ :出力Ⅱの出力電圧,  $Io_2$ :出力Ⅱの出力電流)

ることにより，高周波で高効率のスイッチング電源を設計できることを示した。

本研究により，実用化されたC o 基アモルファス合金の可飽和リアクトル磁心は1985 年から8 年余りの生産実績をもち，大きな市場を築きつつある。

## 第6章 結 言

本章では，本研究で得られた結果をまとめて示した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

多くの電子機器に用いられているスイッチング電源のうちで、可飽和リアクトル磁心を用いた磁気制御型スイッチング電源は、半導体方式と較べて低ノイズで高信頼性を得やすい特徴をもっている。最近、この方式の電源の高周波化による小型軽量化が求められ、それに答える磁心材料の開発が必要になっている。本論文は、この問題を解決するために、C o 基アモルファス合金を高周波スイッチング電源用磁心材料として実用化することを目的として研究を行った結果を纏めたもので、全編6章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、本研究で使用した試料の作製法、性能評価法などについて記述している。

第3章では、零磁歪組成のCo-Fe-Si-B アモルファス合金を基本成分とし、それにMn, M o, Cr, Nb, Ni の各元素を少量添加して、目的の高周波磁心特性に最適の組成を決めている。さらに、これら合金の熱処理条件と経時変化を詳細に検討して、これまでに得られていない高性能磁心薄帯材料の開発に成功している。

第4章では、前章で得られた材料のうち高透磁率および高角形比・低磁心損失のものを用いて、スイッチング電源用のコンモードチョークコイルおよび可飽和リアクトル磁心の評価を行い、その実用化の可能性を検討した結果を述べている。すなわち、高透磁率合金を用いたコンモードチョークコイルの場合は約9 MHz 以下のノイズ除去に有効であり、現用 Mn-Zn フェライトよりも効果が大きいこと、また高角形比・低磁心損失合金を用いた可飽和リアクトルの場合は約200kHz が最適周波数であり、高周波磁心として優れていることを見出し、C o 基アモルファス合金の有用性を実証している。

第5章では、C o 基アモルファス合金の可飽和リアクトル磁心を用いて、200MHz 磁気制御型スイッチング電源を設計し、その性能評価を行った結果を述べている。新しく考案した設計方法で作製したスイッチング電源は $\pm 0.5\%$ 以下の出力変動と約80%の効率を有しており、高周波で高効率の性能を実現している。

第6章は結論であり、本研究の結果を要約している。

以上要するに本論文は、スイッチング電源用の高性能アモルファス磁心材料を開発して高周波で高効率のスイッチング電源の実用化の道をひらいたもので、材料物性学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。